

称号及び氏名	博士（工学） 今井 信幸
学位授与の日付	平成 20 年 1 月 20 日
論文名	「永久磁石同期モータのセンサレス制御における磁気飽和の影響とその高速解析手法に関する研究」
論文審査委員	主査 森本 茂雄 副査 小亀 英己 副査 川本 俊治

論文要旨

近年、モータの小型化、低コスト化や信頼性の向上といった要求から、ロータ位置検出装置を用いることなく、モータの駆動を可能とする位置センサレス制御について、多くの研究が行われている。特に希土類磁石の高性能化に伴って急速に用途が拡大しつつある永久磁石同期モータ（PMSM）に関して、ロータ位置による磁気抵抗の変化（突極性）を用いてロータ位置を推定するセンサレス制御は、ロータ停止時から高速運転時まで、広い速度範囲に適用できることから、種々の手法が提案されている。これら従来の研究のほとんどが磁気飽和を考慮しない線形モデルに基づいて制御則が構築されているが、突極性を利用するセンサレス制御においては、微小な電流の挙動からロータ位置によるインダクタンスの変化を求めするため、磁気飽和が生じるような運転状態においては磁気飽和によりインダクタンスが影響を受け、推定位置誤差の増大等の問題が生じる場合がある。PMSM においてはモータに要求されるトルク密度の向上に加え、小型化のために突極集中巻のような磁気飽和を生じやすい設計が適用されるケースも増えてきており、磁気飽和時にも適用できるセンサレス制御手法の構築が必要となってきた。

このような磁気飽和の影響を検討するには、微小電流と鎖交磁束の変化、つまり局所的なインダクタンスを考慮する必要があるが、微小電流変化時の磁場解析の結果から、差分法により局所的なインダクタンスを計算しても、計算量および計算時間の増大や丸め誤差による精度の悪化といった問題が生じる。また、磁場解析と回路解析の連成解析により、磁気飽和を考慮した過渡応答の解析手法も提案されているが、電流の変化に応じて磁場解析を繰り返し行うため、解析に要する時間が膨大なものとなる。そのため、従来では定常状態や突極性が保持される運転領域の広さについての検討は行なわれていないものの、過渡状態や磁気飽和の影響を積極的に補正する手法については十分な検討が行われていなかった。

本論文は以上のような問題点を考慮し、磁気飽和がセンサレス制御に与える影響について検討を行うとともに、有限要素法を用いた磁気飽和時の局所インダクタンスの計算、回路素子や負荷要素を考慮した過渡応答の高速解析手法についても検討し、磁気飽和の影響を考慮したセンサレス制御系の設計を可能とするものである。

本論文の構成は以下の通りである。

第1章では、本論文の背景および目的とともに、本論文の概要について述べる。

第2章では、センサレス制御の基礎となる、磁気飽和を考慮しない PMSM の線形モデルを導出し、三相高周波電圧印加によるセンサレス制御を提案する。本センサレス制御手法は、非常に簡単な積和演算のみでロータの位置情報の抽出を可能とするものであり、汎用のマイクロプロセッサなどにより容易に制御系を構成することが可能である。また、ロータ位置に関する正弦および余弦を求めることが可能であり、モータのパラメータに依存しない制御系の構築が可能である。

第3章では、有限要素法を用いた磁気飽和の解析手法とセンサレス制御への応用について述べる。従来の微小電流変化時の差分を用いた局所インダクタンスの計算では、丸め誤差の影響も考慮して差分時の電流値を設定する必要があるため、磁気飽和によりインダクタンスが大きく変化するような場合には、電流値の設定が困難であった。ここでは、有限要素法を用いて局所インダクタンスを直接導出する手法を提案し、導出された局所インダクタンスを用いて定常状態での解析を行い、磁気飽和がセンサレス制御に与える影響を明らかにしている。また、解析結果から磁気飽和の影響を補正する手法を提案し、実験により、提案した磁気飽和の補正手法の有効性を実証している。

第4章では、回路素子を考慮したシミュレーション手法を提案する。通常 PMSM は、IGBT などを用いたインバータによって駆動されるが、インバータの PWM 制御におけるデッドタイムなどの素子の動作が出力電圧に影響を与えるため、センサレス制御においても磁気飽和だけでなく、回路素子も考慮したシミュレーションが必要となる。従来、磁気飽和および回路素子の動作を考慮した解析を行うには、磁場解析ツールと回路解析ツールを用いた連成解析が行われていたが、電流の変化に応じて繰り返し磁場解析を行う必要があるため、膨大な計算時間が必要であった。提案手法では、短時間での過渡応答の解析を可能とするため、まずモータの電圧方程式から、応答を計算するために必要なモータ鎖交磁束のロータ位置および電流に関する偏微分値をあらかじめ設定された格子点で計算し、記憶する。過渡応答を計算する際には、あらかじめ計算された格子点での値から、一次補間により各偏微分値の近似値を求めて、電圧方程式の解を導出し、短時間での解析を可能とする。格子点の設定においては、モータ磁気回路の対称性を利用し、格子点数の削減を行い、格子点データを計算する時間の短縮およびデータ記憶容量の削減を実現している。また、低速時のシミュレーション結果と実験結果を比較し、シミュレーション手法の妥当性を確認している。

第5章では、磁石磁束密度の変化がセンサレス制御に与える影響について検討を行う。ネオジウム鉄ボロンなどの希土類磁石は、非常に高い磁束密度を有しており、モータのトルク向上に寄与しているが、温度によりその磁束密度が変化することが知られている。磁石の磁束密度の変化は、通電時の磁束密度に影響を与えるため、磁気飽和時の局所インダクタンスにも影響を及ぼす。ここでは、磁石磁束密度変化時のシミュレーションを行い、磁石磁束密度変化により、センサレス制御時に推定位置誤差が増大することを示し、実験によりその妥当性を確認する。

第6章では、ロータ形状がセンサレス制御に与える影響について検討する。ここでは、磁石表面に突極を持つタイプと、磁石の側面に突極を持つタイプの2つのロータについて、磁気飽和の影響の比較を行う。これら2つのタイプのロータについて、磁石磁束密度の変化の影響および制御パラメータに対するロバスト性の比較を行い、磁石側面に突極を持つタイプのロータが非常に良好なセンサレス制御性および磁石磁束密度変化、制御パラメータに対して高いロバスト性を有することをシミュレーションおよび実機での実験により明らかにして

いる。

第7章では、センサレス制御のハイブリッド自動車への適用について検討する。ハイブリッド自動車では原動機に加えてモータを搭載するため、モータの搭載スペースが大きく制約される。さらに、エンジン始動のために高いモータトルクが要求されるため、磁気飽和は避けられない問題である。従来は、磁気飽和時のセンサレス制御の過渡応答をシミュレートすることが困難であったため、実機によるトライアンドエラーで制御系の構築および制御パラメータの調整を行うしかなく、非常に多くの時間を費やしていた。ここでは、グラフィカルプログラミングツール MATLAB/Simulink を用いて、ハイブリッド自動車のモデルを構築し、第4章で述べた回路素子を考慮したモータのモデルを組み込み、従来実現できなかった、磁気飽和を考慮したエンジン始動時の過渡応答シミュレーションを実現している。また、実験での実験を行いシミュレーションの妥当性を確認するとともに、三相高周波電圧印加によるセンサレス制御により良好なエンジン始動が可能であることを実証する。

第8章では、結論として、本論文の研究を通して得られた知見の総括を行う。

審査結果の要旨

本論文は、小形で高効率であるため近年、産業用、家電用、自動車用など急速に用途が拡大している永久磁石同期モータにおいて、更なる小型化、低コスト化や信頼性の向上といった要求を満たすため、ロータ位置センサを用いることなく、モータを駆動する位置センサレス制御と、センサレス制御に及ぼす磁気飽和の影響およびそれらを高速に解析する手法について行った研究であり、次のような成果を得ている。

- (1) ロータ位置に関する正弦、余弦情報の絶対値を用いた位置誤差指標を用いることで、モータのパラメータに依存せず計算量も少ない三相高周波電圧印加方式センサレス制御法を提案し、その有効性を実験で検証した。
- (2) 有限要素法を用いて局所インダクタンスを直接導出する新規解析手法を提案し、磁気飽和により局所インダクタンスおよび抽出されたロータ位置情報に高次の高調波が発生し、位置誤差が増大することを明らかにした。この結果からセンサレス制御におけるオブザーバの収束点を移動させるという磁気飽和を積極的に補正する手法を提案し、実験により有効性を確認した。
- (3) モータを駆動するインバータの回路素子の動作も考慮してモータの過渡特性を短時間で解析する手法を開発し、さらに、回路素子を考慮したモータモデルにハイブリッド自動車のシミュレーションモデルを組み込み、従来実現できなかった、磁気飽和を考慮したエンジン始動時の過渡応答シミュレーションを実現した。
- (4) 温度による磁石磁束密度の変化がセンサレス制御に与える影響について検討し、磁束密度変化によりセンサレス制御時に推定位置誤差が増大することを明らかにした。
- (5) モータのロータ形状がセンサレス制御に与える影響について検討し、磁石側面に突極を持つタイプのロータが非常に良好なセンサレス制御性能を示し、磁石磁束密度の変化や制御パラメータに対して高いロバスト性を持つことを明らかにした。

以上の研究成果は、永久磁石同期モータの高速かつ高精度な解析手法の発展およびセンサレス制御アルゴリズムの開発、モータ駆動システムの小型化、低コスト化や信頼性の向上に貢献するところ大である。また、申請者が自立して研究活動を行うのに必要な能力と学識を有することを証したものである。学位論文審査委員会は、本論文の審査ならびに学力確認試験の結果から、博士（工学）の学位を授与することを適当と認める。